

ミリ波センサの基礎



Cesar Iovescu
Radar Applications Manager

Sandeep Rao
Radar Systems Architect

テキサス・インスツルメンツ

概要

ミリ波は、波長の短い電磁波を使用する、特殊なクラスのレーダ・テクノロジーです。レーダ・システムは、電磁波信号を送信し、その経路上にある物体が信号を反射します。レーダ・システムは、反射された信号をキャプチャして、物体の距離、速度、角度を判定することができます。

ミリ波レーダは、波長がミリメートル単位で表現できる範囲にある信号を送信します。電磁スペクトルの分野では、これは短波長であり、このテクノロジーにおいて有益なものです。事実、ミリ波信号の処理に必要なとされるアンテナのようなシステム部品のサイズは小型です。短波長のもう1つの利点は、高精度です。76 ~ 81GHzで動作するミリ波システム(対応する波長は約4mm)には、最小で0.1mm単位の動きを検出する能力があります。

ミリ波レーダ・システム全体は、送信(TX)と受信(RX)の無線周波数(RF)部品、クロックのようなアナログ部品、A/Dコンバータ(ADC)やマイコン(MCU)やデジタル・シグナル・プロセッサ(DSP)のようなデジタル部品で構成されています。従来、このようなシステムはディスクリート部品を使用して実装されていました。この場合、消費電力が増加し、全体のシステム・コストが高くなります。複雑さと高い周波数を扱うためシステム設計は挑戦的なものです。

テキサス・インスツルメンツ(TI)はこれらの課題を解決し、CMOS(complementary metal-oxide semiconductor)ベースのミリ波レーダ・デバイスを設計しました。これらのデバイスは、TX-RFとRX-RF、クロックのようなアナログ部品、ADC、マイコン、ハードウェア・アクセラレータのようなデジタル部品を統合しています。TIのミリ波センサ製品ラインアップに属するいくつかのファミリは、追加の信号処理機能を実行できるようにDSPを統合しています。

TIのデバイスは、FMCW(周波数変調連続波)と呼ばれる特殊なクラスのミリ波テクノロジーを実装しています。その名が暗示するように、FMCWレーダは距離、方向、速度を測定する目的で、周波数変調された信号を連続的に送信します。この点は、短いパルスを周期的に送信する従来のパルス・レーダ・システムと異なります。

距離の測定

レーダ・システムの基本的な概念は、電磁波信号の送信と、その経路上にある物体による信号の反射です。FMCWレーダで使用する信号では、時間の経過に応じて、周波数を直線的に高めます。この種の信号を、チャープとも呼びます。図1に、チャープ信号を図示します。ここでは、大きさ(振幅)を時間の関数として表現しています。

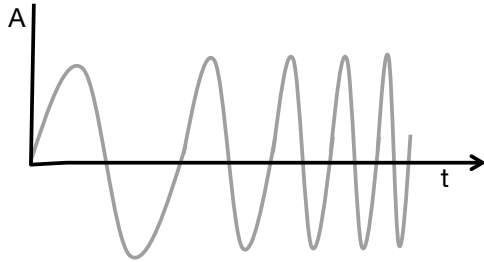


図1：チャープ信号、振幅を時間の関数として表現

図2に同じチャープ信号を示します。ここでは、周波数を時間の関数として表現しています。チャープは、開始周波数(f_c)、帯域幅(B)、持続時間(T_c)を使用して、特性を表現することができます。チャープのスロープ(S)がキャプチャするのは、周波数の変化レートです。例として、図2を前提とすると、 $f_c=77\text{GHz}$ 、 $B=4\text{GHz}$ 、 $T_c=40\mu\text{s}$ 、 $S=100\text{MHz}/\mu\text{s}$ です。

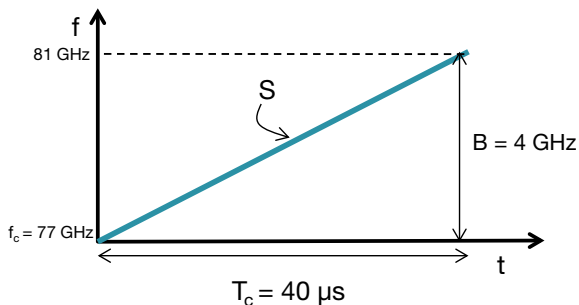


図2：チャープ信号、周波数を時間の関数として表現

FMCWレーダ・システムはチャープ信号を送信し、その経路上にある物体から反射された信号をキャプチャします。図3に、FMCWレーダの主なRF部品で構成された、簡略化したブロック図を示します。レーダは、以下のように動作します。

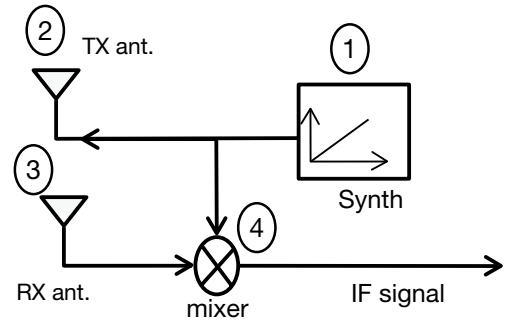


図3：FMCWレーダのブロック図

- シンセサイザ (synth) がチャープを生成。
- このチャープは、送信アンテナ (TX ant) から送信。
- 物体がチャープを反射すると、反射されたチャープが生成され、受信アンテナ (RX ant) によってキャプチャ。
- ミキサ (mixer) はRX信号とTX信号を組み合わせ、中間周波数 (IF) 信号を生成。

周波数ミキサとは、2つの信号を組み合わせ、新しい周波数の新しい信号を生成する電子部品のことです。

2個の正弦入力 X_1 と X_2 を使用する場合、(式1と2)：

$$x_1 = \sin(\omega_1 t + \Phi_1) \quad (1)$$

$$x_2 = \sin(\omega_2 t + \Phi_2) \quad (2)$$

出力 x_{out} の瞬時周波数は、2つの入力正弦波の瞬時周波数の差に等しくなり、出力 x_{out} の位相は、2つの入力信号の位相の差に等しくなります(式3)。

$$x_{out} = \sin[(\omega_1 - \omega_2)t + (\Phi_1 - \Phi_2)] \quad (3)$$

周波数ミキサの動作も、TXとRXの各チャープ周波数応答を時間の関数として表現したグラフに注目する方法で、視覚的に理解できます。

次のページにある図4の上側の図は、単一の物体を検出したときのTXチャープとRXチャープを時間の関数として示しています。RXチャープは、TXチャープが時間遅延したものであることに注意してください。

時間遅延 (τ) は、式4のように数学的に導くことができます。

$$\tau = \frac{2d}{c} \quad (4)$$

ここで、 d は検出された物体との距離であり、 c は光の速度です。

周波数ミキサの出力の地点で、周波数応答を IF 信号の関数として取得するには、図4の上側のセクションで表現されている2つのラインを差し引きます。2つのライン間の距離が固定的な場合、IF信号が、一定の周波数を持つトーンで構成されていることを意味します。図4では、この周波数を $S\tau$ として表示しています。IF信号が有効なのは、TXチャープとRXチャープの両方が重畳している期間のみです(たとえば、図4で、2本の垂直破線の間にある期間)。

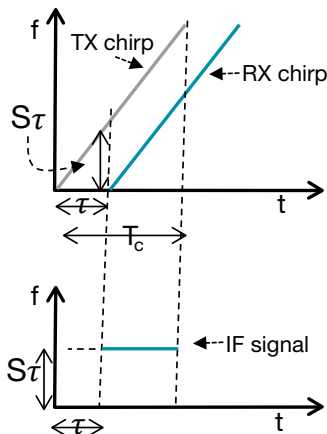


図4：IF周波数は一定

ミキサの周波数信号を、振幅対時間の関数として表現すると正弦波になりますが、この信号は一定の周波数だからです。

IF信号の初期位相 (Φ_0) は、IF信号の開始時点に対応する瞬間的な時間におけるTXチャープの位相とRXチャープの位相の差です(つまり、図4で左側の垂直破線によって表現されている瞬間的な時間)。(式5)：

$$\Phi_0 = 2\pi f_c \tau \quad (5)$$

数学的には、この式からさらに式6を導くことができます。

$$\Phi_0 = \frac{4\pi d}{\lambda} \quad (6)^*$$

要約すると、レーダから見て距離 d にある物体を対象にする場合、IF信号は次のように正弦波になります(式7)。

$$A \sin(2\pi f_0 t + \Phi_0) \quad (7)^{**}$$

$$\text{ここで} \quad f_0 = \frac{S^2 d}{c} \quad \Phi_0 = \frac{4\pi d}{\lambda}.$$

導入編となるこのホワイト・ペーパーでは、物体の速度に対するIF信号の周波数の依存性を無視します。通常、この事実が高速FMCWレーダに及ぼす影響は小さく、しかも Doppler-FFT (ドップラー FFT) 処理を行った段階で、容易に補正できます。ここまでは、レーダがただ1つの物体を検出することを想定していましたが、今度は、複数の物体を検出する状況を分析してみましょう。図5に、複数の物体から受信した3つの異なるRXチャープを示します。各チャープは、物体との距離に比例する時間差の分だけ遅延します。複数のRXチャープが複数のIFトーンを送信し、それぞれは一定の周波数を使用しています。

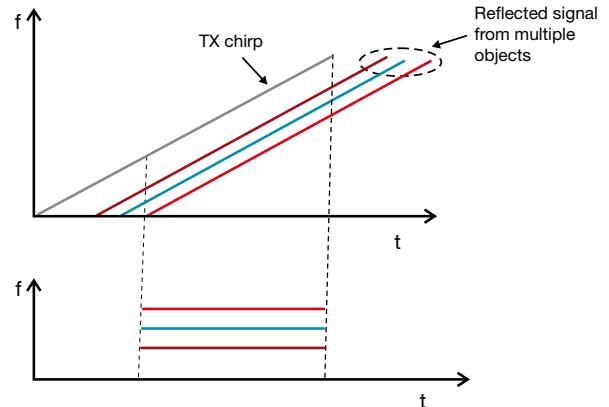


図5：複数物体の検出に対応する複数のIFトーン

* この式は概数であり、スロープと距離が十分小さい場合のみ有効です。ただし、IF信号が距離の小さい変化に線形的に応答するという事実は変わりありません(つまり、 $\Delta\Phi = 4\pi\Delta d/\lambda$)。

** 導入編となるこのホワイト・ペーパーでは、物体の速度に対するIF信号の周波数の依存性を無視します。通常、この事実が高速FMCWレーダに及ぼす影響は小さく、しかも Doppler-FFT (ドップラー FFT) 処理を行った段階で、容易に補正できます。

複数のトーンで構成されているこのIF信号は、複数のトーンを分離する目的で、フーリエ変換を使用して処理する必要があります。フーリエ変換処理により、異なるトーンごとに個別のピークを持つ周波数スペクトルが得られます。各ピークは、特定の距離に物体が存在することを表しています。

距離分解能

距離分解能とは、複数の物体を区別する能力のことです。2つの物体が同じ場所で互いに接近した地点にある場合、レーダ・システムはそれらを個別の物体として区別することができなくなります。フーリエ変換の理論は、IF信号の長さを延ばすと分解能が向上すると説明しています。

IF信号の長さを延ばすために、それに比例して帯域幅を拡大する必要も生じます。IF信号の長さを延ばすと、2つの個別ピークを持つ1つのIFスペクトルが得られます。

また、分解能の上限は $1/THz$ (周期の逆数)ですが、フーリエ変換理論は、観測窓(T)を使用する方法により、その上限を上回って周波数成分を分解できるとも説明しています。これは、周波数の差が次の式で与えられる関係を満たしている場合、2つのIF信号を周波数内で分解できることを意味します。

式8:

$$\Delta f > \frac{1}{T_c} \quad (8)$$

ここで、 T_c は、測定の間隔です。次の関係により、

$$\Delta f = \frac{S^2 \Delta d}{c} \quad \text{式8は次のように表現できます。}$$

$$\Delta d > \frac{c}{2ST_c} = \frac{c}{2B} \quad (\text{since } B = ST_c).$$

続く式は、原文の式を使用してください。距離の分解能(d_{Res})は、チャープによって掃引される帯域幅に依存します(式9)。続く式(9)は、原文の式を使用してください。

$$d_{Res} = \frac{c}{2B} \quad (9)$$

したがって、チャープ帯域幅が数GHzに達するFMCWレーダは、センチメートル単位の距離分解能を実現します(たとえば、チャープ帯域幅が4GHzの場合、距離分解能は3.75cm)。

速度の測定

このセクションでは、複素数を表現するために、ベクトル表記(距離、方向)を使用します。

2つのチャープを使用した速度の測定

速度を測定するために、FMCWレーダは、 T_c で分離された2つのチャープを送信します。反射したチャープは、FFT処理され、物体の距離を検出することになります(range-FFT)。各チャープに対応するrange-FFT(距離FFT)は、同じ場所でピークを示しますが、位相は互いに異なっています。ここで測定した位相の差は、 vT_c という物体の移動に対応しています。

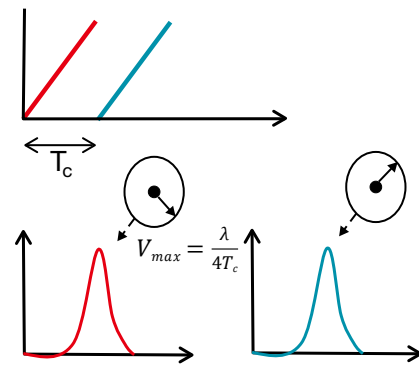


図6: 2つのチャープを使用した速度の測定

式6から導いた位相差は、式10のようになります。

$$\Delta \Phi = \frac{4\pi v T_c}{\lambda} \quad (10)$$

式11を使用して、速度を導くことができます。

$$v = \frac{\lambda \Delta \Phi}{4\pi T_c} \quad (11)$$

速度の測定は位相差に基づいているので、あいまいさが残ります。この測定があいまいでなくなるのは、 $|\Delta \Phi| < \pi$ の場合のみです。上記の式11を使用すると、数学的に次の式を導くことができます。

$$v < \frac{\lambda}{4T_c}.$$

式12は、 T_c の間隔で離れた2つのチャープを使用して測定する場合の最大相対速度(v_{max})を示しています。より高い v_{max} を実現するには、これらのチャープ間で送信時間を短くすることが求められます。

$$V_{max} = \frac{\lambda}{4T_c} \quad (12)$$

同じ距離にある複数の物体の速度の測定

2つのチャープを使用した速度の測定が機能しない状況があります。複数の物体が測定の時点で異なる速度で移動しており、両者がレーダから同じ距離にあるときです。これらの物体は同じ距離だけ離れているので、同一のIF周波数を持つ反射チャープを生成することになります。その結果、range-FFTは単一のピークを生成し、これは同じ距離だけ離れているこれらの物体すべてから返された、結合された信号を表しています。単純な位相比較方式は機能しません。この場合、速度を測定するために、レーダ・システムは2つより多くのチャープを送信する必要があります。

レーダ・システムは、間隔が等しい、N個1組のチャープを送信し、これら一連のチャープを、チャープ・フレームと呼びます。図7は、1つのチャープ・フレームに対して、周波数を時間の関数として表現しています。

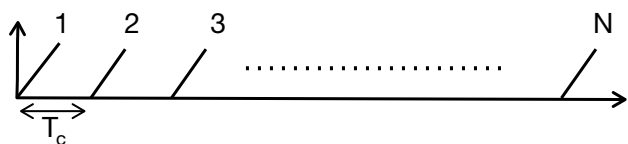


図7：チャープ・フレーム

以下で説明する処理方式は、レーダから等距離だけ離れている2個の物体が、異なる速度 V_1 と V_2 で移動している例を使用します。

Range-FFTは、反射された一連のチャープを処理し、その結果、同一の場所にピークが存在するN個のセットが得られます。ただし、それぞれの位相は異なっており、これらすべての物体から得られた位相の寄与を保持しています（これらの各オブジェクトから得られた個別位相の寄与は、図8で赤と青のベクトルとして表現しています）。

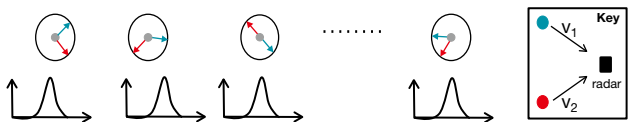


図8：反射されたチャープ・フレームに対して range-FFT を実行すると、N個のベクトルが得られる

Doppler-FFTと呼ばれる2番目のFFTを、N個のベクトルに対して実行し、2つの物体を分解します。このことを図9に示します。

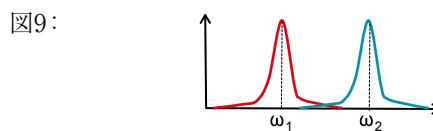


図9：Doppler-FFTは2個の物体を分離

ω_1 と ω_2 は、各物体を対象とする複数の連続チャープ間の位相差に対応します(式13)。

$$v_1 = \frac{\lambda \omega_1}{4\pi T_c}, v_2 = \frac{\lambda \omega_2}{4\pi T_c} \quad (13)$$

速度分解能

離散フーリエ変換の理論は、次の式が成立する場合に、2つの個別周波数 ω_1 と ω_2 が分解できると説明しています。

$$\Delta \omega = \omega_2 - \omega_1 > 2\pi / N \text{ ラジアン/サンプル。}$$

$\Delta \omega$ は次の式 $\Delta \Phi = \frac{4\pi v T_c}{\lambda}$ (式10) で定義することもできるので、以下の条件が成立している場合、つまり、速度分解能 (v) を導けるのは、フレーム期間が $T_f = N T_c$ に等しい場合は、数学的に次の式を導くことができます。(式14)

$$v > v_{Res} = \frac{\lambda}{2T_f} \quad (14)$$

レーダの速度分解能は、フレーム時間 (T_f) に反比例します。

角度の検出

角度の推定

FMCWレーダ・システムは、図10に示すように水平面を使用して、反射された信号の角度を推定します。この角度を、到来角 (Angle of Arrival、AoA) と呼びます。

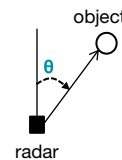


図10：到来角

角度の推定は、物体との距離に関する小さい変化が、range-FFTまたはDoppler-FFTのピークでベクトルの変化をもたらすという観測に基づいています。図11に示すように、少なくとも2個のRXアンテナを使用し、この結果に基づいて角度の推定を行います。物体と各アンテナとの距離には差があり、この差が原因で、FFTのピークに位相の変化が生じる結果になります。位相の変化を利用して、AoAを推定できます。

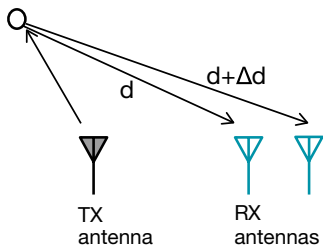


図 11 : AoA を推定するには、2 個のアンテナが必須

この構成では、式15のように、数学的に位相の変化を導きます。

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta d}{\lambda} \quad (15)$$

平面の波面を想定すると、基本的な幾何学は、 $\Delta d = l \sin(\theta)$ という関係を示します。ここで、 l は複数のアンテナ間の距離を意味します。したがって、到来角 (θ) は、式16を使用して、測定した $\Delta\phi$ から計算することができます。

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda\Delta\phi}{2\pi l}\right) \quad (16)$$

$\Delta\phi$ が $\sin(\theta)$ に依存していることに注意してください。これを、非線形の依存性と呼びます。 $\sin(\theta)$ が線形関数で近似できるのは、 θ の値が小さい場合のみです。 $\sin(\theta) \sim \theta$ 。

その結果、推定の精度はAoAに依存し、図12に示すように、 θ の値が小さい場合はさらに精度が向上します。

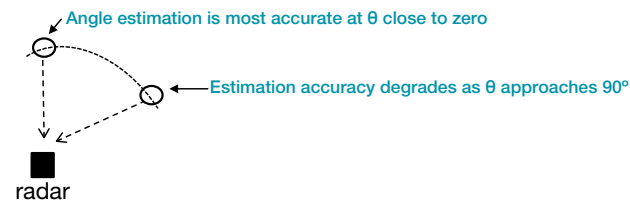


図 12 : 値が小さい場合は、AoA の推定精度が向上

最大角の視野

レーダにとって最大角の視野は、レーダが推定できる最大AoAと定義されています。図13をご覧ください。

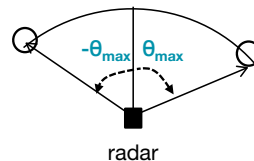


図 13 : 最大角の視野

あいまいではない方法で角度を測定するには、 $|\Delta\omega| < 180^\circ$ であることが必須です。式16を使用すると、この事実は次の式に対応します。

$$\frac{2\pi l \sin(\theta)}{\lambda} < \pi.$$

式17は、 l の間隔だけ離れた2個のアンテナがサービスの対象とすることができる最大視野が次の式に等しいことを示しています。

$$\theta_{max} = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{2l}\right) \quad (17)$$

2個のアンテナの間隔に対して $l = \lambda/2$ という計算を行うと、最大角の視野として $\pm 90^\circ$ という結果が得られます。

テキサス・インスツルメンツのミリ波センサ・ソリューション

想像できるように、FMCWセンサはRF、アナログ電子部品、デジタル電子部品を組み合わせる方法で、物体の距離、速度、角度を判定することができます。

図14に示すブロック図は、さまざまな部品で構成されています。

TIは、DSP、マイコン、TX RF、RX RF、アナログ部品、デジタル部品を、シングルチップRFCMOSに統合する方法により、FMCWセンシングの分野で革新を実現しました。

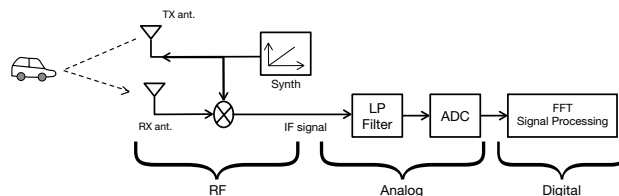


図 14 : FMCW センサを形成する、RF、アナログ、デジタルの各部品

TIのRFCMOSミリ波センサを、SiGeベースの従来のソリューションから差異化している要因は、ミリ波RFフロント・エンドとマイコン/ハードウェア・アクセラレータ/DSPの処理バックエンドにより、フレキシビリティとプログラマビリティを実現していることです。SiGeベースのソリューションが蓄積できるチャープの数に制限があり、実際のフレームの進行中にチャープとチャープ・プロファイルを更新するにはリアルタイムの介入を必要とするのに対し、TIのミリ波センサ・ソリューションは512個のチャープを蓄積でき、フレームを開始する前に4個のプロファイルを定義することができます。このスケラビリティを通じて、TIのミリ波センサは複数の構成を使用して容易に構成を行い、場面から抽出する役立つデータの量を最大化することができます。個別のチャープと処理バックエンドは「即座に」カスタム化することができ、リアルタイム・アプリケーションがいつもの長距離、速い速度、高い分解能、または特定の処理アルゴリズムを必要とする場合に対処できます。

TIの車載用ミリ波センサ製品ラインアップは、高性能のフロント・エンド・レーダである [AWR1243](#) センサから、シングルチップ・レーダで、[AWR1443](#) センサと [AWR1642](#) センサまでスケール化されています。設計者は、ISO 26262など、先進運転支援システム (ADAS) と自律運転に関する安全規制に対処することができ、その結果、AWRミリ波製品ラインアップを採用すると、車載セーフティ・インテグリティ・レベル (ASIL) -Bを実現できます。

TIの産業用ミリ波センサ製品ラインアップは、2つのシングルチップ・デバイスで構成されています。1つは [IWR1443 ミリ波センサ](#) であり、ハードウェア・アクセラレータを搭載してレーダ信号処理に対応しています。もう1つの [IWR1642 ミリ波センサ](#) はDSPを使用して、必要な処理を実行します。DSPはさらにフレキシビリティが高く、追跡や分類のような高度なレベルのアルゴリズムをソフトウェア統合することができます。これらのシングルチップ・デバイスを採用すると、距離、速度、角度など、物体に関する高精度のデータに簡単にアクセスでき、その結果、高度なセンシングを、性能と効率を必要とする新興アプリケーションで実現することができます。これに該当するのは、スマート・インフラ、ファクトリ・オートメーションの Industry 4.0 (産業革命 4.0) とビル・オートメーションの各製品、さらに自律型ドローンです。

テキサス・インスツルメンツは、産業用や車載用のミリ波センサ製品の開発に携わるエンジニアに、以下のような包括的な開発環境をすでに公開しています。

- [AWR1x](#) と [IWR1x](#) の各ミリ波センサのハードウェア評価モジュール。
- [mmWaveソフトウェア開発キット \(SDK\)](#) は、RTOS、ドライバ、信号処理ライブラリ、mmWave API、mmWaveLink、およびセキュリティ機能 (別途入手可能) で構成。
- [mmWave Studio](#) オフライン・ツールは、アルゴリズムの開発と分析を目的としており、データ・キャプチャ、ビジュアライザ、システム推定機能で構成。

ミリ波センサの製品、ツール、およびソフトウェアの詳細については、www.tij.co.jp/mmwave をご覧になり、今すぐ設計を開始してください。



TIの設計情報およびリソースに関する重要な注意事項

Texas Instruments Incorporated ("TI")の技術、アプリケーションその他設計に関する助言、サービスまたは情報は、TI製品を組み込んだアプリケーションを開発する設計者に役立つことを目的として提供するものです。これにはリファレンス設計や、評価モジュールに関する資料が含まれますが、これらに限られません。以下、これらを総称して「TIリソース」と呼びます。いかなる方法であっても、TIリソースのいずれかをダウンロード、アクセス、または使用した場合、お客様(個人、または会社を代表している場合にはお客様の会社)は、これらのリソースをここに記載された目的にのみ使用し、この注意事項の条項に従うことに合意したものとします。

TIによるTIリソースの提供は、TI製品に対する該当の発行済み保証事項または免責事項を拡張またはいかなる形でも変更するものではなく、これらのTIリソースを提供することによって、TIにはいかなる追加義務も責任も発生しないものとします。TIは、自社のTIリソースに訂正、拡張、改良、およびその他の変更を加える権利を留保します。

お客様は、自らのアプリケーションの設計において、ご自身が独自に分析、評価、判断を行う責任がお客様にあり、お客様のアプリケーション(および、お客様のアプリケーションに使用されるすべてのTI製品)の安全性、および該当するすべての規制、法、その他適用される要件への遵守を保証するすべての責任をお客様のみが負うことを理解し、合意するものとします。お客様は、自身のアプリケーションに関して、(1) 故障による危険な結果を予測し、(2) 障害とその結果を監視し、および、(3) 損害を引き起こす障害の可能性を減らし、適切な対策を行う目的で、安全策を開発し実装するために必要な、すべての技術を保持していることを表明するものとします。お客様は、TI製品を含むアプリケーションを使用または配布する前に、それらのアプリケーション、およびアプリケーションに使用されているTI製品の機能性を完全にテストすることに合意するものとします。TIは、特定のTIリソース用に発行されたドキュメントで明示的に記載されているもの以外のテストを実行していません。

お客様は、個別のTIリソースにつき、当該TIリソースに記載されているTI製品を含むアプリケーションの開発に関連する目的でのみ、使用、コピー、変更することが許可されています。明示的または黙示的を問わず、禁反言の法理その他どのような理由でも、他のTIの知的所有権に対するその他のライセンスは付与されません。また、TIまたは他のいかなる第三者のテクノロジーまたは知的所有権についても、いかなるライセンスも付与されるものではありません。付与されないものには、TI製品またはサービスが使用される組み合わせ、機械、プロセスに関連する特許権、著作権、回路配置利用権、その他の知的所有権が含まれますが、これらに限られません。第三者の製品やサービスに関する、またはそれらを参照する情報は、そのような製品またはサービスを利用するライセンスを構成するものではなく、それらに対する保証または推奨を意味するものでもありません。TIリソースを使用するため、第三者の特許または他の知的所有権に基づく第三者からのライセンス、あるいはTIの特許または他の知的所有権に基づくTIからのライセンスが必要な場合があります。

TIのリソースは、それに含まれるあらゆる欠陥も含めて、「現状のまま」提供されます。TIは、TIリソースまたはその仕様に関して、明示的か暗黙的にかかわらず、他のいかなる保証または表明も行いません。これには、正確性または完全性、権原、続発性の障害に関する保証、および商品性、特定目的への適合性、第三者の知的所有権の非侵害に対する黙示的保証が含まれますが、これらに限られません。

TIは、いかなる苦情に対しても、お客様への弁済または補償を行う義務はなく、行わないものとします。これには、任意の製品の組み合わせに関連する、またはそれらに基づく侵害の請求も含まれますが、これらに限られず、またその事実についてTIリソースまたは他の場所に記載されているか否かを問わないものとします。いかなる場合も、TIリソースまたはその使用に関連して、またはそれらにより発生した、実際の、直接的、特別、付随的、間接的、懲罰的、偶発的、または、結果的な損害について、そのような損害の可能性についてTIが知らされていたかどうかにかかわらず、TIは責任を負わないものとします。

お客様は、この注意事項の条件および条項に従わなかったために発生した、いかなる損害、コスト、損失、責任からも、TIおよびその代表者を完全に免責するものとします。

この注意事項はTIリソースに適用されます。特定の種類の資料、TI製品、およびサービスの使用および購入については、追加条項が適用されます。これには、半導体製品(<http://www.ti.com/sc/docs/stdterms.htm>)、評価モジュール、およびサンプル(<http://www.ti.com/sc/docs/sampterm.htm>)についてのTIの標準条項が含まれますが、これらに限られません。